

## 融合主题和视觉特征的图片拼贴画合成方法

杨祖义<sup>1,2)</sup>, 张俊松<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> (厦门大学智能科学与技术系艺术认知与计算实验室 厦门 361005)

<sup>2)</sup> (光电控制技术重点实验室 洛阳 471000)

(zhangjs@xmu.edu.cn)

**摘 要:** 为辅助设计师进行图片拼贴画艺术创作, 提出一种融合主题和视觉特征的图片拼贴画合成方法. 给定容器图片和素材图片集, 将容器图片划分为若干子区域; 并使用圆填充算法及 Delaunay 三角剖分算法生成子区域的 Voronoi 图, 得到补丁集; 之后, 计算主题-颜色相似性矩阵, 进行素材图片与补丁之间的映射; 最后, 使用颜色线性融合方法进一步优化拼贴画视觉效果. 在保留图片视觉特征的同时, 该方法亦能保证容器和素材之间具有相似的主题信息. 与市面流行拼贴画制作软件的对比实验表明, 该方法合成的图片拼贴画能取得更好的视觉效果, 在数字媒体和装饰领域中均有着潜在的应用价值.

**关键词:** 图片拼贴画; 主题-颜色相似性; 圆填充算法; 布局优化

中图分类号: TP391.41 DOI: 10.3724/SP.J.1089.2019.17569

## Picture Collage Synthesis Considering Theme and Visual Features

Yang Zuyi<sup>1,2)</sup> and Zhang Junsong<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> (Mind, Art & Computation Group, Cognitive Science Department, Xiamen University, Xiamen 361005)

<sup>2)</sup> (Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471000)

**Abstract:** To assist designers in picture collage art creation, we propose a picture collage synthesis method considering both theme and visual features. First, given a container image and resource image set, we divide the container image into sub regions. Then, we adopt the circle packing algorithm and Delaunay triangulation algorithm to generate the sub regions' Voronoi diagram and obtain a patch set. Next, we construct a theme-color similarity matrix and calculate the mapping between resource images and patches. Finally, we apply the color linear fusion method to optimize the visual effect of the collage. While preserving the visual features of the container image, the proposed method can also guarantee similar theme information between the container image and the resource images. The comparative experiment with popular software shows that the proposed collage image synthesis method is able to achieve a more visual pleasing result and could be used potentially in the field of digital media and decoration design.

**Key words:** picture collage; theme-color similarity; circle packing algorithm; layout optimization

图片拼贴画是一种由若干图片在容器中进行合理地空间布局所形成的设计艺术形式. 其通常

由设计者收集合适数量的图片, 按照一定的艺术规则或约束条件将图片拼贴在容器中进行创作而

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-11-21. 基金项目: 国家自然科学基金(61772440); 光电控制技术重点实验室和航空科学基金联合资助项目(20165168007); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1706). 杨祖义(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学; 张俊松(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, CCF 高级会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机图形学、数字媒体、脑与认知科学.

成。在信息时代, 图片拼贴画能够充分利用互联网和生活中丰富的图片资源, 将其变为具有艺术价值的装饰作品, 在数字媒体、广告宣传、艺术设计等领域中均有着广泛的应用前景。

传统的图片拼贴画一般由富有经验的艺术家或设计师手工创作完成。首先需要在满足图片语义和视觉相关性的条件下收集足够数量的候选图片; 然后将这些图片按照一定的美学规则摆放在容器中, 得到初步结果; 最后微调布局, 使得结果更加符合人的审美要求, 得到最终作品。由于手工创作过程十分烦琐, 图片拼贴画的计算机辅助创作则成为当前计算机辅助艺术设计领域的研究课题。这些工作大体上可分为图 1 所示 3 类: (1) 传统拼贴画。在一些基本规则的约束下, 将若干图片无缝无规则地放置在容器中, 实现图片集合的快速浏览。(2) 图片马赛克。以真实图片为容器, 考虑容器图片和素材图片的视觉相关性, 有选择性地将素材图片放置进入容器中, 实现容器图片的视觉仿真。(3) 图片蒙太奇。选择相同系列的图片放置进入容器中, 获得蒙太奇式的视觉效果。不同于以上 3 种风格, 本文提出的图片拼贴画具有新的风格特点, 其融合了图片马赛克和图片蒙太奇两者的视觉特征, 生成的拼贴画在保留容器图片视觉特征的同时, 也能保证容器图片和素材图片之间具有相似的主题信息。



图 1 图片拼贴画分类示例

要生成理想的图片拼贴画效果, 需要解决以下 2 个关键问题: (1) 考虑图片内容和拼贴画的视觉美观性, 如何合理地对容器图片进行划分。(2) 如何在拼贴画中同时保留容器图片的主题和视觉特征。在现有的工作中, 文献[1-7]采用水平垂直、人工预定义及网格划分等方法来解决第 1 个问题。在文献[6]的基础上, 本文结合使用圆填充算法和 Delaunay 三角剖分算法来分割子区域, 生成子区域的 Voronoi 图(补丁集)。在主题和视觉特征的保留上, 目前大部分工作<sup>[8-10]</sup>和 Artensoft Photo Collage Maker 软件多考虑图片的视觉特征, 而忽略了图

片的主题内容。与这些工作不同, 本文构建综合考虑主题和颜色的相似性矩阵, 使得合成的拼贴画在尽量保留容器图片视觉特征的同时, 也能保证容器照片和素材图片之间具有相似的主题信息。

## 1 相关工作

近年来, 研究者在图片拼贴画的计算机辅助设计领域开展了很多工作。本文将从传统拼贴画、图片马赛克, 以及图片蒙太奇的合成 3 个方面对这些工作进行讨论。

在传统拼贴画合成方面, 与本文工作最为相关的是文献[6]。文献[6]将拼贴画的合成看做映射问题, 首先根据图片集中图片的重要性给其赋以权值; 再使用圆填充算法分割矩形区域, 进行图片填充, 并保证更大权值的图片占据更多的展示空间; 最后, 进行图片边缘美化, 得到最终拼贴画作品。本文借鉴其几何填充思想, 结合圆填充算法和 Delaunay 三角剖分算法进行子区域的布局设计。与文献[6]工作不同在于: 首先, 该方法的布局空间为类似于矩形等的规则容器, 而本文容器从图像生成, 需要对任意形状的图像子区域进行布局设计。其次, 该方法致力于在同一空间中展示更多更重要的图片信息, 从而方便用户对图片信息进行浏览(类似图 1a); 而本文综合考虑图片的主题和视觉特征, 以合成具有艺术美感和实用价值的拼贴画艺术作品。除了文献[6], 在传统拼贴画的合成方面还有很多其他典型的工作。文献[11]提出了一种基于贝叶斯框架的传统拼贴画自动生成算法, 使用矩形框对图片的显著区域进行提取, 并将整个布局过程规划为最大后验概率问题。文献[12]使用自适应的图片裁剪算法来裁剪图片显著区域, 并采用遗传算法对图片进行布局设计。文献[1,4,13]将相似的图片放置在一起, 提出了保留图片相似性的拼贴画合成方法。除了上述工作, 文献[2]还尝试在移动平台上进行拼贴画的合成。文献[14]提出了一种基于用户满意度的建模方法来生成拼贴画。以上工作的目标均是解决如何方便用户快速有效地浏览图片集合的内容。与这些工作不同, 本文更多地考虑图片的主题和视觉特征, 实现容器图片的视觉仿真, 从而合成出一种美观且实用的拼贴画艺术作品。

在图片马赛克生成方面, 文献[5]提出基于能量方程的图片马赛克合成框架, 支持任意形状的

容器图片及图片集合, 但其图案元素具有一定程度的形变. 在文献[5]的基础上, 文献[10]提出了一个复杂的算子解决了形变问题. 文献[9]提出了一种自适应块匹配算法来划分容器, 使得马赛克各分块间的颜色过渡更加和谐. 遗憾的是, 这些工作仅仅考虑了图片的视觉特征, 而忽略了图片的主题内容, 使得合成的拼贴画内容层次不够丰富.

在图片蒙太奇生成方面, 文献[15]使用模糊化的方式来提取容器中的感兴趣区域, 并遵循一定的艺术规则将图片放置于这些区域, 以合成图片蒙太奇视觉效果. 文献[8]提出 Arcimboldo 风格的图片蒙太奇效果合成方法, 其使用均值漂移聚类法分割图片, 并采用形状-颜色相似性匹配方式进行合成. 相比于该工作, 本文不仅考虑了颜色、形状等视觉特征, 还考虑图片的主题内容, 以得到更加丰富的视觉效果.

此外, 一些图案合成工作也与本文工作十分相关, 例如, 手绘图案和装饰图案字形的合成. 文献[16]提出了一种结合局部和整体特征的手绘图案合成方法, 以用户绘制的小块图案为样本, 合成在视觉感受上与样本相近的大面积的新图案. 文献[17]则提出了一种装饰字形的合成方法, 先将字形进行分割, 再使用一些语义和形状契合的艺术风格图案元素来合成装饰字形, 不过这类工作更适合矢量图案的合成.

为了提供一种新颖实用的拼贴画合成方法, 本文在以上工作的基础上, 提出了一种融合主题和视觉特征的拼贴画合成方法. 该方法的优点在于合成的拼贴画在尽量保留原图视觉特征的同时, 也能保证容器照片和素材图片之间主题信息的相似性.

## 2 本文方法

本文方法的整体流程图如图 2 所示.

首先, 以一张图片为容器, 给定素材图片集合, 结合使用文献[18-19]的方法将容器图片划分为若干子区域; 然后, 使用圆填充算法和 Delaunay 三角剖分算法生成子区域的 Voronoi 图, 将子区域进一步分割为小的补丁集; 接下来, 分别通过语义标签向量和 HSV 直方图计算素材图片与补丁间的主题和颜色相似性, 以及计算素材图片集和补丁集间的最佳映射; 最后, 采用颜色线性融合方法处理子图片之间的连接部分, 进一步优化结果图的视觉效果.

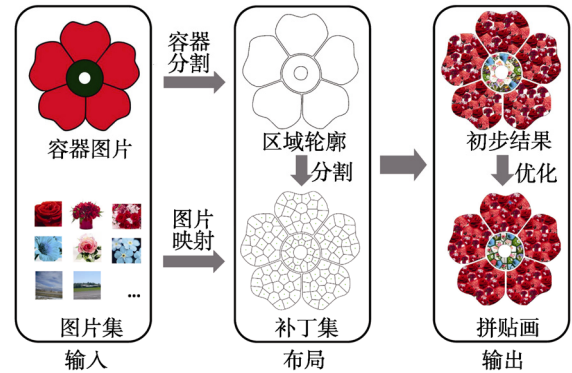


图 2 系统流程图

### 2.1 区域布局

得到容器图片的若干子区域后, 本文首先使用圆填充算法得到子区域中均匀分散的若干种子点, 然后基于这些种子点, 使用 Delaunay 三角剖分算法生成 Voronoi 图, 得到子区域的补丁集.

经典的圆填充问题<sup>[20-22]</sup>解决的是如何将一系列圆(半径指定)不重叠地放置进入某个子区域中. 本文则并未指定各圆半径, 而是给定初始半径后, 在规则约束下驱动各圆进行动态膨胀和移动, 得到稳定的位置分布; 再使用各圆圆心作为 Delaunay 三角剖分算法的种子点输入. 另外, 本文采用小圆优先膨胀的策略, 以获取分布更加均匀的种子点.

问题定义: 给定容器子区域  $R$  和圆集合  $C = \{c_i, L, c_n\}$ , 需调整各圆位置和半径, 最大化各圆的面积总和, 使其尽可能覆盖  $R$ . 约束条件为

$$\begin{cases} c_i \subseteq R, i \in \{1, \dots, n\} \\ c_i \cap c_j = \emptyset, i, j \in \{1, \dots, n\} \\ \max \left( \sum_{i=1}^n A(c_i) \right) \leq A(R) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $A(R)$  为区域面积.

算法策略描述如下:

输入. 容器子区域  $R$  和圆的个数  $n$ .

输出. 种子点集合  $S = \{s_i, L, s_n\}$ .

Step1. 随机初始化各圆位置, 半径初始化为 0; 维持圆列表  $L$ , 以半径升序排列.

Step2. 检测  $L$ , 若  $L$  为空, 算法结束; 否则取出  $L$  中的第 1 个圆, 记为  $c$ .

Step3. 增大圆  $c$  半径(膨胀). 若满足式(1), 则将  $c$  重新加入列表, 转 Step2; 否则, 执行下一步.

Step4. 计算圆  $c$  所受合力. 若合力为 0, 转 Step6; 否则, 执行下一步.

Step5. 使圆  $c$  向合力方向移动. 若满足式(1), 则将  $c$  重新加入列表, 转 Step2; 否则, 执行下一步.

Step6. 子区域采样, 遍历整个子区域寻找圆  $c$  的替代位置(能够放置圆  $c$  且还有剩余空间). 若找到, 将圆  $c$  重新加入列表. 转 Step2.

算法中, 圆的合力计算公式为

$$L_{c_i, c_j} = d(p_i, p_j) - r_i - r_j \quad (2)$$

$$F_{c_i, c_j} = \begin{cases} 0, & \text{if } L_{c_i, c_j} \geq 0 \\ (p_i - p_j) \cdot L_{c_i, c_j}, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{c_i} = \sum_{j=0}^n F_{c_i, c_j}, \quad i \neq j \quad (4)$$

其中,  $d(p_i, p_j)$  表示 2 个圆心的欧氏距离;  $r_i$  和  $r_j$  表示 2 个圆的半径;  $p_i$  和  $p_j$  为圆心坐标的向量表示. 得到圆填充问题的解之后, 记录各圆圆心位置作为 Delaunay 三角剖分算法的种子点, 生成 Voronoi 图(补丁集). 值得注意的是, 圆填充算法对 Delaunay 三角剖分算法有着较好的辅助作用, 可使得生成的 Voronoi 图(补丁集)拥有更加合理的空间布局效果, 如图 3 所示.

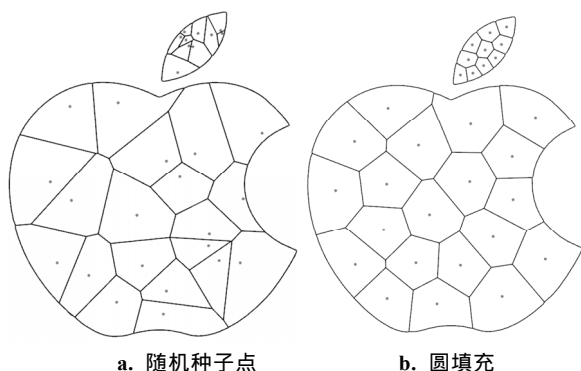


图 3 算法效果对比

## 2.2 图片映射

得到补丁集后, 需要为该集合寻找一组合适的图片进行填充. 通常, 选择与目标图片主题相似的图片比选择无关的图片来生成图像拼贴画更能吸引用户的注意力, 同时也更能反映出拼贴画的主题. 为此, 本文综合考虑了图片的主题和颜色特征, 构建了一个主题-颜色相似性矩阵来进行图片映射.

下面分别介绍主题相似性、颜色相似性, 以及综合考虑两者的主题-颜色相似性度量方法.

### 2.2.1 主题相似性度量

当前的图像主题相似性或语义相似性度量, 往

往通过分析伴随文本实现. 图像伴随文本描述了对应图像的主要信息, 如图像内容、主题、类别等. 它们通常通过人工标注的形式获得.

由于图片的自动标注十分困难, 亦由于本文所需的图片库过于庞大, 图片的收集、整理和标注等工作难以在短时间内完成, 本文直接采用图片素材库 SUN Attribute Dataset 作为本文系统的基本图片库<sup>[23]</sup>. 该图片库是 SUN Dataset 的一个子集, 共有 14 340 张图片, 涉及 102 个种类. 图片集中每一张图片都有着对应的语义标签向量, 向量的每一维度则是图片中含有某一类事物的概率.

获得图片库的语义标签向量后, 还需要对容器图片进行标注, 指定容器图片的所属类别和对应概率, 得到容器图片的语义向量  $W$ . 接下来, 需要计算容器图片和素材图片的语义标签向量  $W$  和  $M$  的 Jaccard 距离, 以此来度量两者之间的主题相似性, 计算公式为

$$D_{EJ}(W, M) = \frac{W \cdot M}{\|W\|^2 + \|M\|^2 - W \cdot M} \quad (5)$$

其中,  $W$  是容器图片的语义向量;  $M$  为素材图片的语义向量;  $D_{EJ}$  的值越大, 2 个向量的相似度越高, 2 张图片之间的主题相似性越高.

### 2.2.2 颜色相似性度量

图片颜色作为图片的一种最直观特征, 在图像检索中被广泛使用. 颜色直方图是图像检索中最常使用的色彩空间描述符, 它主要统计不同颜色在整幅图像中所占的比例, 对颜色所处的空间位置进行忽略. 颜色直方图有很多类, 目前比较常用的有 RGB 直方图、HSV 直方图等. 由于 RGB 颜色空间并不符合人眼对颜色的主观认识, 因此本文采用 HSV 颜色直方图作为素材图片颜色的描述符. 本文将  $H$  分量划分为 16 个等级,  $S$  分量划分为 8 个等级,  $V$  分量划分为 3 个等级. 此外, 为了加快图像检索速度, 需事先对图片库进行 HSV 直方图计算, 从而建立 HSV 直方图索引.

得到图片库的 HSV 直方图后, 再依次计算补丁集中每个补丁所覆盖容器图片区域的 HSV 直方图, 按照 2 个直方图向量的交叉集的总和大小来衡量两者的相似度, 其公式为

$$D_{INT}(H_1, H_2) = \sum_i \min(H_1(i), H_2(i)) \quad (6)$$

其中,  $H_j(i)$  表示直方图  $j$  中的第  $i$  个分区的数值, 两者取其小, 得到交集;  $D_{INT}$  值越大, 表明 2 个



直方图越相似,颜色相似性也就越高。

### 2.2.3 主题-颜色相似性度量

为了使得拼贴结果拥有较好的视觉效果,采取如下策略:补丁越大,则选择主题更加相似的图片进行映射,以使用户更容易理解拼贴画所表达的主题;补丁越小,应该选择颜色更加相似的图片进行映射,以便拼贴画更多地保留容器图片的视觉特征。进而,通过此策略,定义主题-颜色相似性度量方法

$$E_{match}(P_i, I_j) = \omega_t \cdot D_{EJ}(W(P_i), M(I_j)) + \omega_c \cdot D_{INT}(H(P_i), H(I_j)) \quad (7)$$

其中,  $\omega_t$  和  $\omega_c$  分别为主题和颜色相似性权重,由补丁的大小决定;  $P_i$  和  $I_j$  分别为第  $i$  个补丁和第  $j$  张素材图片;  $W$  和  $M$  分别为补丁和素材的语义标签向量,补丁的语义标签向量由容器图片的语义标签向量代替;  $D_{EJ}$  为主题相似性值;  $H$  为相应的 HSV 直方图;  $D_{INT}$  为颜色相似性值;  $E_{match}$  值越大,两者的语义-颜色相似度越高。

通过计算补丁和素材图片之间的主题-颜色相似性值,构建主题-颜色相似性矩阵。对于每一个补丁,在邻域图片多样化的前提下(相邻的补丁所映射的图片尽可能不一样),获取主题-颜色相似性最高的图片放置到该补丁所在的区域,从而生成整张图片拼贴画。

### 2.3 拼贴画视觉效果优化

映射图片之后,可得到初步结果图。但由于结果图由子图拼接而成,子图的连接处存在视觉效果不自然现象,如锯齿等。因此,还需要使用颜色线性融合算法来进行效果优化。

在补丁边缘连接处,对容器图片和素材图片的颜色值进行线性融合,从而保留容器图片的颜色视觉特征。融合公式为

$$C_p = C_{src} + (C_{sub} - C_{src}) \cdot d_p / d_{max} \quad (8)$$

其中,  $P$  为补丁边缘附近一点;  $C_p$  为点  $P$  最终的颜色值;  $d_p$  为点  $P$  到对应补丁边界线的最小距离;  $C_{sub}$  为点  $P$  对应位置素材图片的颜色值;  $C_{src}$  为点  $P$  对应位置容器图片的颜色值;  $d_{max}$  为本文定义的最大融合距离,由补丁的大小决定。

为了验证颜色线性融合算法的效果,本文生成了2张结果图进行对比,如图4所示。从图4可以看出,在使用边缘融合算法之前,拼贴画中补丁连接处存在锯齿现象,如蓝色椭圆部分;在使用边

缘融合算法之后,补丁之间颜色过渡更加柔和,画面整体视觉效果更加美观。

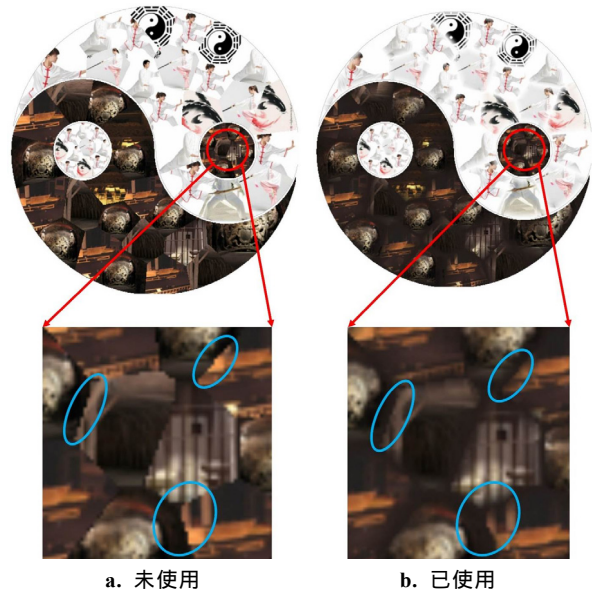


图4 颜色线性融合算法使用效果对比

## 3 结果与评估

在 Windows10 系统下使用 VS2015 编程实现了本文方法,其基于 OpenFrameWork 框架(OF 0.8.1),系统 CPU 为酷睿 I5-3470,4 核,运行内存为 8 GB,频率为 3.2 GHz。

为验证本文方法的有效性,将本文拼贴结果与 Artensoft Photo Collage Maker (简称“ArtenSoft”)的结果进行了对比分析。Artensoft 是一款认可度较高的拼贴画制作软件,它和本文方法生成的结果如图5所示。从图5可以看出,ArtenSoft 方法虽然很好地保留了原始图像的视觉特征,但在图中对象的边缘处存在锯齿现象,且整体画面较为模糊;与 Artensoft 相比,本文方法生成的结果克服了这一问题。另外,本文引入了图片的主题特征,保证了容器图片和素材图片之间主题信息的相似性,使得拼贴画蕴含了更加丰富的主题信息,增强了其应用价值。

为验证本文方法的实用性,本文生成了更多的图片拼贴画效果,如图6和图7所示。其中,图6所示为合成的红楼梦影视作品3个主要人物的拼贴画效果,可以看出,其图案元素均为87版红

① <http://www.artensoft.com/>



图 5 本文方法和 Artensoft 软件生成结果图像对比



图 6 红楼梦主要人物拼贴画



图 7 泰坦尼克号场景人物拼贴画

楼梦的场景或人物头像, 该拼贴画在保留原图视觉效果的同时, 也保证了原图和素材图片的主题信息的相似性. 图 7 所示为对电影泰坦尼克号经典场景中人物的拼贴画效果. 本文使用了电影中的一些场景图片对于人物的衣服和头发进行了拼贴, 使得图片整体呈现出了蒙太奇式的视觉效果.

尽管本文方法与相关方法相比能取得理想效果, 但其仍存在一些局限性: (1) 本文方法的基本

假设在于图片库中拥有足够多的主题和颜色相关的图片. 然而, 若图片库中没有足量匹配的图片, 那么结果图将存在颜色或主题不匹配的情况, 如图 8 所示. 由图 8 可以看出, 拼贴结果和原图片的颜色存在较为明显的差异, 见红色椭圆部分. (2) 如果能从素材图片中提取跟主题相关的画面, 作为生成拼贴画的内容, 应有助于拼贴画的视觉效果; 但本文当前主要关注融合主题和视觉特征的拼贴画合成方法, 对此未作考虑, 这将在未来的工作中予以考虑.

图 9 中展示了本文方法的更多结果, 用于说明本文方法的普适性.

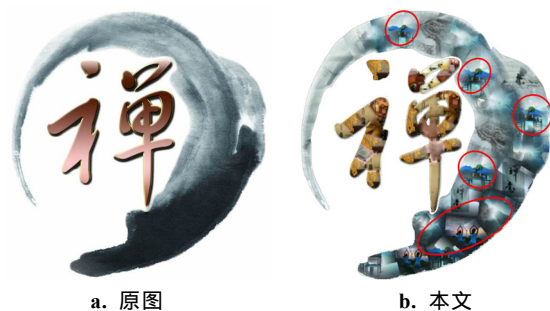


图 8 颜色不匹配问题说明



图 9 本文方法生成的更多结果

## 4 结 论

本文提出了一种融合主题和视觉特征的图片拼贴画合成方法. 用户输入一张容器照片和一个素材图片集, 系统可较快地合成一张具有艺术美感和实用价值的图片拼贴画, 其融合了图片马赛克和图片蒙太奇的视觉效果. 另外, 本文方法由于有机地融合了图片的主题和视觉特征, 使得生成的拼贴画在尽可能保留容器图片视觉特征的同时, 也考虑了容器照片和素材图片之间主题信息的相似性, 这极大地增强了其在数字媒体、广告传媒和艺术设计等领域中的应用价值, 使其具有更加广阔的应用前景.

## 参考文献(References):

- [1] Han X T, Zhang C Y, Lin W Y, *et al.* Tree-based visualization and optimization for image collection[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, 46(6): 1286-1300
- [2] Lee M H, Singhal N, Cho S, *et al.* Mobile photo collage[C] // *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 24-30
- [3] Mei T, Yang B, Yang S Q, *et al.* Video collage: presenting a video sequence using a single image[J]. *The Visual Computer*, 2008, 25(1): 39-51
- [4] Fried O, Diverdi S, Halber M, *et al.* IsoMatch: creating informative grid layouts[J]. *Computer Graphics Forum*, 2015, 34(2): 155-166
- [5] Kim J, Pellacini F. Jigsaw image mosaics[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 657-664
- [6] Yu Z Q, Lu L, Guo Y W, *et al.* Content-aware photo collage using circle packing[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2014, 20(2): 182-195
- [7] Brivio P, Tarini M, Cignoni P. Browsing large image datasets through Voronoi diagrams[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(6): 1261-1270
- [8] Huang H, Zhang L, Zhang H C. Arcimboldo-like collage using internet images[J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2011, 30(6): Article No.155
- [9] Lee H Y. Automatic photomosaic algorithm through adaptive tiling and block matching[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(22): 24281-24297
- [10] Pavić D, Ceumern U, Kobbelt L. GIzMOs: genuine image mosaics with adaptive tiling[J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, 28(8): 2244-2254
- [11] Wang J D, Quan L, Sun J, *et al.* Picture collage[C] // *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006, 1: 347-354
- [12] Battiato S, Ciocca G, Gasparini F, *et al.* Smart photo sticking[C] // *Proceedings of International Workshop on Adaptive Multimedia Retrieval*. Heidelberg: Springer, 2007: 211-223
- [13] Liu L J, Zhang H J, Jing G M, *et al.* Correlation-preserving photo collage[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(6): 1956-1968
- [14] Bianco S, Ciocca G. User preferences modeling and learning for pleasing photo collage generation[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2015, 12(1): Article No.6
- [15] Goferman S, Tal A, Zelnik-Manor L. Puzzle-like collage[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 459-468
- [16] Liu Dongwei, Zhang Junsong, Zhou Changle. Stroke pattern synthesis based on local and global features[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(1): 144-151(in Chinese)  
(刘东威, 张俊松, 周昌乐. 考虑局部和整体特征的手绘图案合成[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(1): 144-151)
- [17] Zhang J S, Wang Y, Xiao W Y, *et al.* Synthesizing ornamental typefaces[J]. *Computer Graphics Forum*, 2017, 36(1): 64-75
- [18] Dollár P, Lawrence Zitnick C. Structured forests for fast edge detection[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 1841-1848
- [19] Selinger P. Potrace: a polygon-based tracing algorithm[OL]. [2018-09-03].  
[https://www.researchgate.net/publication/237244800\\_Potrace\\_a\\_polygon-based\\_tracing\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/237244800_Potrace_a_polygon-based_tracing_algorithm)
- [20] Dowsland K A. Optimising the palletisation of cylinders in cases[J]. *Operations-Research-Spektrum*, 1991, 13(4): 204-212
- [21] George J A, George J M, Lamar B W. Packing different-sized circles into a rectangular container[J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 84(3): 693-712
- [22] Chen Mao, Huang Wenqi. A heuristic algorithm of the unequal circle packing problem[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2007, 44(12): 2092-2097(in Chinese)  
(陈 矛, 黄文奇. 求解不等圆 Packing 问题的一个启发式算法[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(12): 2092-2097)
- [23] Patterson G, Xu C, Su H, *et al.* The SUN attribute database: beyond categories for deeper scene understanding[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014, 108(1/2): 59-81